

陈景华, 银燕, 林振毅, 等. 2011. 黄山顶大气气溶胶吸收和散射特性观测分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 641–648. Chen Jinghua, Yin Yan, Lin Zhenyi, et al. 2011. An observational study of aerosol optical properties at the top of Huangshan Mountains [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 641–648.

黄山顶大气气溶胶吸收和散射特性观测分析

陈景华 银燕 林振毅 陈魁 康汉青 严家德

南京信息工程大学, 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京 210044

摘 要 采用光声黑碳仪 (PASS) 2008 年 5~7 月在黄山光明顶的连续观测资料, 分析了该地区大气气溶胶吸收和散射系数变化特征及其与气象因子的关系。分析结果表明: 在相对干燥的条件下 (相对湿度小于 60%) 吸收散射系数日变化明显, 总体上白天大, 晚上小; 相对湿度与吸收和散射系数有很强的正相关性, 相关系数分别为 0.87 和 0.80, 而风速与散射吸收系数则呈现负相关关系, 吸收系数、散射系数与风速的相关系数分别为 -0.53 和 -0.78 ; 湿清除使大气气溶胶的吸收和散射系数明显降低; 与在平原地区的南京相比, 黄山山顶的吸收和散射系数日变化趋势与南京相反, 且数值比南京小一个量级。

关键词 黄山 气溶胶 吸收系数 散射系数 气象因子

文章编号 1006-9585 (2011) 05-0641-08 **中图分类号** P41 **文献标识码** A

An Observational Study of Aerosol Optical Properties at the Top of Huangshan Mountains

CHEN Jinghua, YIN Yan, LIN Zhenyi, CHEN Kui, KANG Hanqing, and YAN Jiade

China Meteorological Administration Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The absorption and scattering coefficients of atmospheric aerosols were measured continuously using the Photo Acoustic Soot Spectrometer (PASS) during May to July in 2008 at the Guangmingding meteorological observatory on Huangshan Mountains. The characteristics of absorption and scattering coefficients, such as the diurnal variation and the relationships to meteorological factors were analyzed. The results show that, under the relative dry conditions (with the relative humidity lower than 60%), the absorption and scattering coefficients are larger during the daytime than that at night. It is found that both of these two coefficients are well correlated with relative humidity (with the correlation coefficients of 0.87 and 0.80, respectively), and are negatively correlated with the local wind speed (with the correlation coefficients of -0.53 and -0.78 , respectively). It is also shown that both the absorption and scattering coefficients are remarkably reduced due to precipitation or fog. Compared with the properties measured in Nanjing, it is found that the values of absorption and scattering coefficients measured on Huangshan Mountains are order of magnitude smaller, and that the daily cycle is almost opposite to that in Nanjing. The possible reasons for this are explored.

Key words Huangshan Mountains, aerosol, absorption coefficient, scattering coefficient, meteorological factors

收稿日期 2009-12-31 收到, 2011-07-12 收到修定稿

基金项目 江苏省高校科技创新团队项目, 江苏省“333 人才工程”计划, 国家重点研究发展计划项目 2006CB403706

作者简介 陈景华, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为大气成分变化与区域气候效应。E-mail: chenjh1213@163.com

责任作者 银燕, email: yinyan@nuist.edu.cn

1 引言

气溶胶的光学性质对大气环境及大气中的物理过程有直接或间接的影响,特别是对大气辐射的影响尤为重要。近年来随着经济的快速发展,人类活动影响的不断加大,气溶胶的光学特征也出现了新的特点。宗雪梅等(2005)对1993~2002年中国16个辐射观测站的资料分析得出了近10年气溶胶光学厚度的分布,结果与罗云峰等(2000)描述的总体增加的趋势已经有所不同。这说明气溶胶人为源的影响越来越重要,而人为源在地域上存在分布不均匀性,导致了各地气溶胶的各种理化和光学特性不同(胡欢陵等,1991;杨琨等,2008)。这就需要我们进行新的观测以对目前大气状况进行重新认识和评估。

气溶胶的消光系数对研究大气辐射的衰减有重要意义。由Beer定律可知,辐射能被吸收的量正比于其通过路径中对辐射产生削弱的分子及粒子数目。因此观测气溶胶消光系数对研究大气辐射以及气候变化有重要意义。国外早期的研究证明气溶胶的吸收作用主要是化石、生物燃料的不完全燃烧形成的黑碳造成的(Japar and Szkarlat, 1981)。气溶胶吸收系数的测量最常用的是通过基于过滤膜的方法间接测量(Horvath, 1993),采用此方法的常见仪器为PSAP(Particle Soot Absorption Photometer)(Horvath, 1997; Moosmüller et al., 1998; Bond et al., 1999)。利用光声学的原理也是测量吸收系数的重要方法之一(Adams et al., 1990; Petzold and Niessner, 1996)。此外,利用机载和卫星遥感的方法也可以研究气溶胶的光学特性(Reidmiller et al., 2006)。

我国对气溶胶光学特性的观测始于20世纪80年代,当时毛节泰等(1983)采用的是多波段太阳光度计观测法。90年代以来李放和吕达仁(1996)、周秀骥等(1998)开始采用宽带消光法和天空亮度法。黄世鸿等(2000)利用简单易行的粒子采样法得到了空间很广的较为合理的气溶胶对可见辐射的吸收资料。张玉香等(2002)利用CE318太阳光度计在2000年7月到2001年7月的观测实验,计算得到了约50天的气溶胶光学厚度和Junge参数等大气光学特性数据,给出了

北京地区气溶胶光学性质的分布特征。李扬等(2005)在西安使用黑碳仪(Aethalometer),其原理是利用黑碳气溶胶对可见光的强烈吸收的特性来测量黑碳气溶胶浓度,结果显示黑碳气溶胶浓度与污染指数有良好的一致性。

本文采用本实验室最新引进的光声黑碳仪(Photo Acoustic Soot Spectrometer, PASS)在黄山进行观测实验。该仪器是基于光声学原理来测量气溶胶吸收系数的。Arnott et al. (2003)通过与黑碳仪、PSAP的测量进行对比,发现光声学的方法与黑碳仪测得的黑碳浓度呈线性关系,与PSAP测得的吸收系数有很好的相关性,而PSAP在相对湿度剧烈变化时,其测量的数据的稳定性降低。声光学的方法测得结果是可靠的,Arnott et al. (2005)在研究七波段黑碳仪的特性时,就曾用PSAP、三波段浊度计以及声光学仪器的测量结果作为评估黑碳仪的标准。国内的陈宇等(2009)利用PASS对南京北郊雾霾天气下的气溶胶吸收和散射系数进行了观测实验。本文主要利用PASS在黄山的观测资料,研究分析黄山地区气溶胶吸收和散射系数的变化特征及其与气象要素之间的关系。

2 资料简介与环境背景

2.1 数据采集

本文数据采集所用仪器为DMT公司生产的PASS。它是用波长为781 nm的激光测量体积吸收系数(β_{abs} ,下文简称吸收系数)和体积散射系数(β_{scat} ,下文简称散射系数),记录量纲单位为 Mm^{-1} ($1 \text{ Mm}^{-1} = 10^{-6} \text{ m}^{-1}$)。图1为PASS的流程图。

Arnott et al. (1999)对PASS的工作原理及性能参数进行了详细描述。该仪器的主要特点是样本流未被干燥直接流进共鸣器腔内部,其速率为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。气流中的气溶胶粒子通过吸收激光光能对气体产生周期性的加热,其温度变化可由温度传感器测得,此过程不会改变气溶胶(包括含水粒子)的性质及其在空气中的分布状态,从而对气溶胶吸收和散射系数的测量没有影响,加热的气体膨胀产生声压力波,安装在共鸣器一端的麦克风测得声波声压 P_{mic} 。其中激光的功率

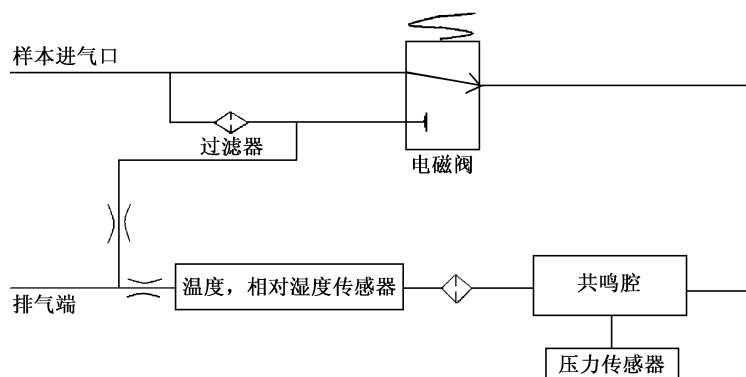


图 1 PASS 流程图

Fig. 1 The flow diagram of PASS

P_{laser} 可由积分球探测器测量得到。由测得的声压以及激光的功率通过公式:

$$\beta_{\text{abs}} = \frac{P_{\text{mic}}}{P_{\text{laser}}} \frac{A_{\text{res}}}{\gamma - 1} \frac{\pi^2 f_0}{Q}$$

就可以得到吸收系数 β_{abs} 的值, 其中, A_{res} 、 f_0 和 Q 分别是共鸣器的横截面积、频率和质量因子; γ 是加热时空气的等容比; 散射系数 β_{scat} 是通过光倍增管的散射探头测量的。

本文对 2008 年 5 月 1 日至 2008 年 7 月 28 日期间利用 PASS 在黄山光明顶 [(30°08'N, 118°09'E), 海拔 1840.4 m] 取得的观测资料和同期在相同位置由自动气象站取得的气象要素观测资料进行分析。黄山是我国著名的风景区, 该地区主要产业为旅游业, 在其周边工厂及各种污染源相对较少。所以该区的观测结果理论上比城市的观测结果低。历史观测分析也有类似结论, 如蒋龙海 (1983) 利用 1980 年秋季、1982 年春季在南京和黄山光明顶的观测资料, 分析了两地大气光学厚度的特点, 结果显示无论是春季还是秋季黄山的大气光学厚度都比南京小。随着近几年南京地区的工业发展水平远快于黄山地区, 相信这一差距会更加明显。根据 2007 年统计资料 (安徽省统计局, 2008) 显示黄山地区空气质量达到或好于二级的天数为 365 a^{-1} , PM10 (空气动力学当量直径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物) 年平均浓度仅为 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 远远低于长三角其它地区。

2.2 气候及天气背景

皖南山区是安徽的多雨量中心之一。其中年雨量最大值 (2369.3 mm) 就出现在黄山光明顶。而根据统计资料, 黄山地区的降水主要集中在春

季和夏季, 这两季节光明顶的观测记录达到 720.2 mm 和 1030.9 mm。本次数据采集时间为 4~7 月, 处在黄山地区的多雨时间段。2008 年黄山地区 6 月 8 日入梅, 期间有持续强降水天气, 6 月 29 日出梅。在观测期间的 4 个月里, 光明顶上基本上都以雨雾天气为主, 相对湿度比较大, 其中 4、5、6 和 7 月相对湿度为 100% 的比例分别达到 55.2%, 32.4%, 61.2%, 74.1% [其中 7 月的气象资料到 12 日 08 时 (北京时间, 下同)]。相对湿度达 100% 的小时数占总有效观测小时数的 52.2%, 而相对湿度小于 60% 的小时数所占比例仅为 20.5%。黄山的雾按形成机制大致可分为两种: 一种是辐射雾; 另一种是在空气流动时, 由于受到地形的阻挡迫使它沿着山坡上升, 随着温度的降低, 沿山坡上升的空气很快就成了饱和空气并继续上升达到过饱和, 多余的水汽凝结而形成雾。在黄山顶上除了雨雾以外, 当云海出现时, 也会伴随着很大的相对湿度。黄山云海是由低云和地面雾形成的, 低云主要指层积云。云海发生的天气条件为: 雨过天晴后, 在高气压的作用下, 便形成成片的稳定层积云海。在本次观测期间, 4 月和 5 月中也有较多云海出现 (黄山天气在线 <http://www.hstqzx.gov.cn> [2009-05-19])。

3 结果分析

3.1 数据的处理

本文主要分析在相对干燥的条件下, 气溶胶粒子消光系数的变化规律。故选取相对湿度小于

60%的情况下的数据进行分析。PASS 资料为每隔 1~2 s 记录一次, PASS 本身测量有多种数据, 首先读取 PASS 资料中所需的 β_{abs} 和 β_{scat} 数据, 再读取自动气象站资料。由自动气象站资料项筛选出相对湿度小于 60% 的数据。根据相对湿度筛选出符合条件的散射系数和吸收系数数据。在相对湿度小于 60% 的条件下, 对 2008 年 4~7 月的资料进行处理分析 (其中 4 月仪器故障, 7 月没有符合要求的数据), 主要讨论了在相对干燥的条件下, 散射系数和吸收系数的变化规律及影响它们变化的气象因子。

3.2 散射系数和吸收系数的变化特征

散射过程和吸收过程都会从入射的光束中削减能量, 即都有消光作用, 且二者的消光作用可以叠加, 定义总消光系数即为散射系数与吸收系数之和, 以 β_{ex} 表示。由以上处理所得的数据, 可以给出在相对湿度小于 60% 的条件下日平均变化趋势, 表 1 给出了筛选后符合条件的散射系数和吸收系数以及总消光系数的日平均值。

从表 1 可以看出, 在 5 月 11 日、5 月 17~23 日、6 月 3~5 日的总消光系数比较大, 总消光系数都大于 20 Mm^{-1} , 在 6 月 4 日达到了 32.49 Mm^{-1} , 而在峰值之后会出现低谷, 如在 5 月 29~30 日、6 月 24~26 日、28~29 日这一现象表现尤为明显。在 6 月 29 日总消光系数降到了只有 1.1 Mm^{-1} 。分析天气状况发现, 5 月 27~29 日是连续雨雾天气, 特别是 27 日下了大雨, 雨水冲刷使得空气中的气溶胶粒子移除; 而 6 月 8 日黄山入梅, 雨水逐渐增多, 6 月 18~23 日一直有大雾并有小雨, 到 24 日才由雨雾天气转为多云, 雾滴也可以经过湿清除过程使气溶胶粒子移除出大气; 黄山 6 月 29 日出梅, 之前连续的梅雨天气对大气中各种微粒的清除作用使得其后粒子浓度出现一个低谷。结合天气形势不难发现, 峰值出现的天气在晴天或多云天气, 原因是在太阳辐射较强时会使得下垫面加热较快, 使近地面层不稳定, 产生湍流混合使较低层的粒子输送到高层 (观测点), 使山顶大气粒子浓度增加导致散射和吸收系数增大。

3.3 散射系数和吸收系数的日变化特征

图 2 分别给出了相对湿度较小和全部观测样本下散射和吸收系数的日变化情况。比较图 2a 和

表 1 相对湿度小于 60% 条件下 β_{abs} 、 β_{scat} 和 β_{ex} 的日平均数据表

Table 1 The daily mean of β_{abs} , β_{scat} , and β_{ex} when the relative humidity is below 60% Mm^{-1}

日期	β_{abs}	β_{scat}	β_{ex}
5 月 2 日	2.910	21.295	24.205
5 月 4 日	0.972	8.975	9.947
5 月 5 日	1.579	13.128	14.706
5 月 6 日	1.290	10.777	12.068
5 月 11 日	2.787	18.056	20.843
5 月 12 日	3.203	15.309	18.512
5 月 13 日	1.682	10.800	12.483
5 月 14 日	1.936	14.721	16.657
5 月 15 日	2.150	9.875	12.025
5 月 16 日	2.133	9.646	11.779
5 月 17 日	4.285	21.462	25.747
5 月 19 日	3.197	23.775	26.972
5 月 20 日	4.152	25.713	29.865
5 月 21 日	2.767	17.662	20.429
5 月 23 日	3.179	26.286	29.465
5 月 29 日	0.318	1.232	1.550
5 月 30 日	0.316	1.424	1.740
5 月 31 日	0.200	2.462	2.662
6 月 1 日	0.379	1.826	2.206
6 月 2 日	2.593	11.472	14.065
6 月 3 日	5.073	22.867	27.940
6 月 4 日	5.707	26.786	32.493
6 月 5 日	1.389	20.114	21.503
6 月 6 日	2.359	12.890	15.248
6 月 12 日	1.411	10.567	11.978
6 月 24 日	0.778	4.558	5.337
6 月 25 日	0.674	4.731	5.405
6 月 26 日	0.472	4.871	5.343
6 月 28 日	0.245	1.226	1.471
6 月 29 日	0.374	0.735	1.109

2b 可以看出: 其共同特点是散射和吸收系数在午夜和凌晨较低, 白天在午后也有一个小低谷, 一天之中有两个较大的峰值, 一个出现在中午前, 一个出现在傍晚大概 18 时左右。另外, 图 2b 中的量值比图 2a 略小, 这可能是图 2b 所用的数据中包含了雨水冲刷后的时间段, 使得整体平均略小。总体上在加入相对湿度条件后, 日变化的基本趋势没有改变。

分析图 2a 可看出, 散射和吸收系数总体表现

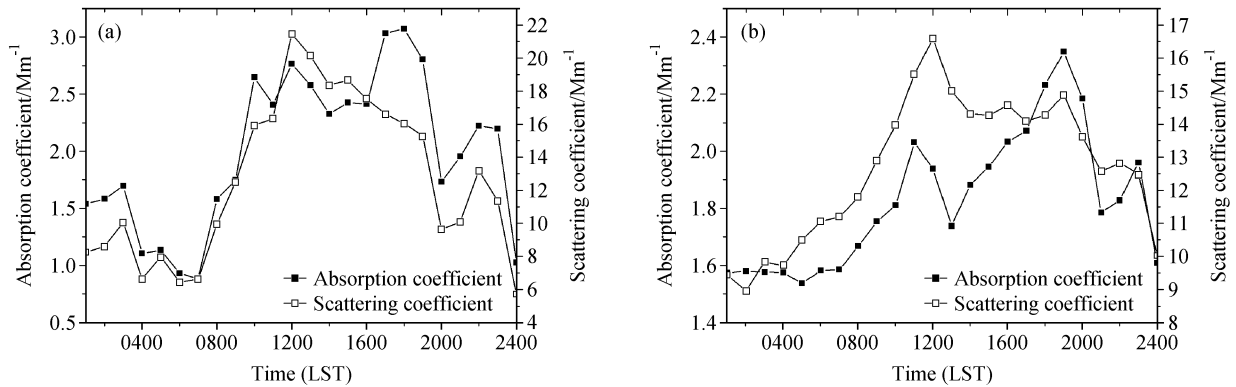


图2 散射和吸收系数的日变化图：(a) 相对湿度小于60%条件下的日变化；(b) 无数据筛选的日变化

Fig. 2 The diurnal variations of absorption and scattering coefficients; (a) Diurnal variations when relative humidity is below 60%; (b) diurnal variations in normal condition

为白天较高，晚上比较低。散射系数的最大值出现在12时，达到21.45 Mm⁻¹，最小值出现在00时，只有5.70 Mm⁻¹；吸收系数的最大值出现在18时，达3.07 Mm⁻¹，最小值出现在07时，只有0.88 Mm⁻¹，可以看出散射系数大概比吸收系数大1个量级。在日出以后散射和吸收系数迅速上升，这是由于太阳辐射开始加热山顶以下的地表，使低层的大气边界层湍流扩散能力增强，大气中的污染物随大气湍流扩散，将山下的粒子输送到光明顶，使局地粒子数浓度增加，最终导致散射和吸收系数增大，在中午时分达到峰值；而太阳辐射加热大气使得气溶胶粒子表面的水汽蒸发，减小气溶胶粒子的半径，同时山顶地表也受太阳辐射加热，使山顶贴地层的湍流增强而加快粒子的扩散，两者对散射和吸收系数的减弱作用随温度的增加而增强，这种减弱作用导致在午后散射和吸收系数出现一个低谷；16时以后太阳开始迅速辐射减弱，导致自山顶向上由不稳定向稳定层结过渡，湍流扩散作用减弱，气溶胶粒子累积导致吸收系数的回升。在日落以后散射吸收系数迅速下降，这是由于到了夜晚山顶以下各个高度上逆温开始出现，湍流受到抑制，同时各个高度上边界层顶随时间也逐渐降低，带走一部分高层的粒子，使高层气溶胶浓度减小。此外，黄山地区散射吸收系数还可能受到山谷风的影响；而白天光明顶游人众多也会使散射吸收系数增大。

图3给出了2007年9月在南京取得的观测数据，也是选取晴天或多云天气状况下做出的平均

日变化图。这里我们将在南京取得的资料与黄山地区观测资料进行对比分析。

由图3可以发现，吸收系数在04时和22时有两个较大的峰值，而散射系数则在04时至07时这一时间段较大；整体上散射吸收系数都表现为白天小，晚上大。与图2a比较可见，在数值上南京比黄山地区干燥条件下的数值大7~9倍左右，这与气溶胶数浓度随高度递减是相符合的。南京地区的日变化可以用边界层中湍流的发展演变来解释（游荣高等，1983；邱金桓，1986）。从图3中可以看出，日出以后，散射吸收系数都随时间迅速下降，并在午后达到最低，这是由于随着太阳直接辐射的加强，地表温度上升，边界层内的湍流也开始增强，湍流扩散加快了污染物的扩散，使得局地浓度下降。在晴天的午后14时前

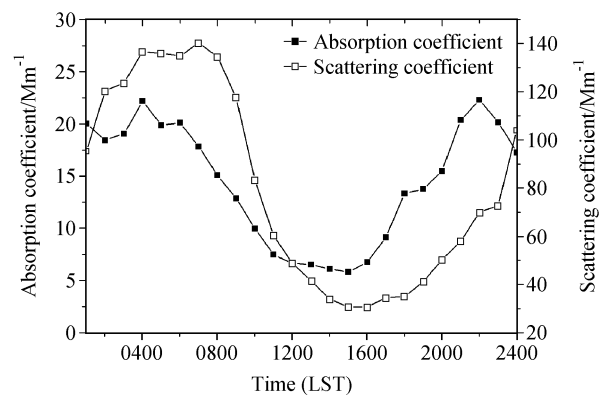
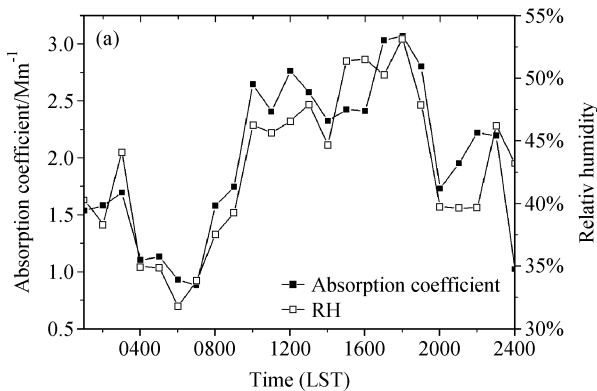


图3 在南京晴天条件下测得的吸收和散射系数

Fig. 3 The absorption and scattering coefficients observed in clear days in Nanjing

后气温达到最大值, 这样湍流发展也就最旺盛, 扩散也最强烈, 造成气溶胶浓度在午后最小; 16 时以后太阳辐射开始减小, 地表开始降温, 湍流发展开始受到抑制湍流扩散减弱, 受边界层顶的高度越来越低的影响, 大气气溶胶粒子开始向低层累积, 造成散射吸收系数开始增大, 这种趋势随着边界层在夜晚出现逆温表现的更加明显, 边界层内污染物浓度也不断增大, 散射吸收系数也不断增大。同黄山地区一样, 在南京地区散射系数比吸收系数大, 只是在南京地区散射系数大约是吸收系数的 4 倍左右, 说明南京地区的大气颗粒污染物中以散射性气溶胶成分 (如硫酸盐、硝酸盐、有机碳等) 为主。这与陈宇等 (2009) 在南京北郊的分析结果是一致的。南京地区气溶胶粒子的散射吸收系数白天小, 晚上大。比较黄山和南京, 可以认为造成两地散射吸收系数日变化明显不同的原因是: (1) 观测点的高度不同, 南京的观测点在距地面 30 m 的高度, 而黄山的光明顶海拔 1840 m; (2) 下垫面条件不同, 南京观测的下垫面为城市郊区, 而黄山起伏很大, 下垫面极其复杂, 使边界层对气溶胶浓度时空分布的影响不同; (3) 观测的环流背景不同, 南京是在秋、冬季观测的, 黄山是在春、夏季观测的, 这样观测时两地受到的大尺度环流系统不一样, 这样大气环流经长距离输送来的气溶胶粒子物理特性和浓度也会有所不同; (4) 气溶胶的源不同, 黄山山顶为洁净地区, 相对于南京受人类活动影响较小, 特别是受工业活动影响更小。



3.4 相对湿度对散射吸收系数的影响

图 4 给出了在比较干燥的条件下吸收和散射系数与相对湿度变化趋势的对比图。由图可以看出, 散射和吸收系数都与相对湿度呈正相关关系。吸收系数与相对湿度的相关系数为 0.87, 而散射系数与相对湿度的相关系数为 0.80, 略小于前者。当相对湿度增大时, 亲水性气溶胶粒子会因吸收水汽而改变其物理化学特性, 从而使气溶胶的散射和吸收系数改变。杨军等 (1999) 认为相对湿度通过改变谱分布使吸收系数增大, 相对湿度对吸收系数的影响程度随波长变化, 即对于占太阳辐射能主要部分的 $0.5 \mu\text{m}$ 附近的波长, 相对湿度对气溶胶粒子吸收的影响是相对比较显著的; 文章还指出低相对湿度对散射的影响要小于高相对湿度的对散射的影响。由图 4 b 可以发现散射系数主要在 16 时至 20 时与相对湿度的变化有一定的出入, 说明散射系数还受其它因子影响。

3.5 风速对散射吸收系数的影响

图 5 为在相对湿度小于 60% 的情况下, 吸收系数和散射系数与风速的相关关系图。在中午前后 (10 时至 14 时) 风速都比较小, 而此时散射吸收系数最大; 夜间情况正好相反, 风速较大而散射吸收系数较小, 特别是在午夜这一趋势尤为明显。可以看出风速与散射吸收系数具有良好的负相关性, 其中吸收系数和散射系数与风速的相关系数分别为 -0.53 和 -0.78 。这种负相关关系可以理解为, 在风速增大时, 水平气流加快了对气溶胶粒子的运输, 使局地气溶胶高浓度地区更快

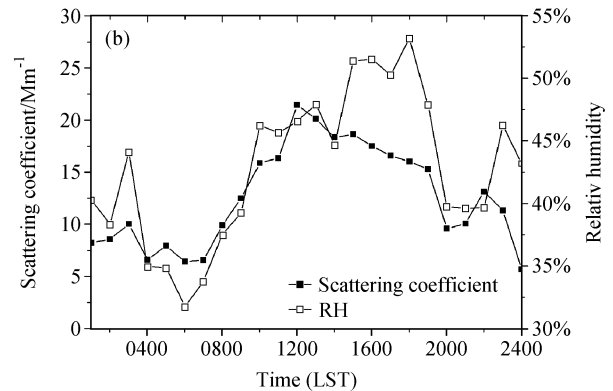


图 4 相对湿度小于 60% 条件下 (a) 吸收系数、(b) 散射系数与相对湿度的对比图

Fig. 4 The correlation between relative humidity and (a) absorption coefficient, (b) scattering coefficient when relative humidity is less than 60%

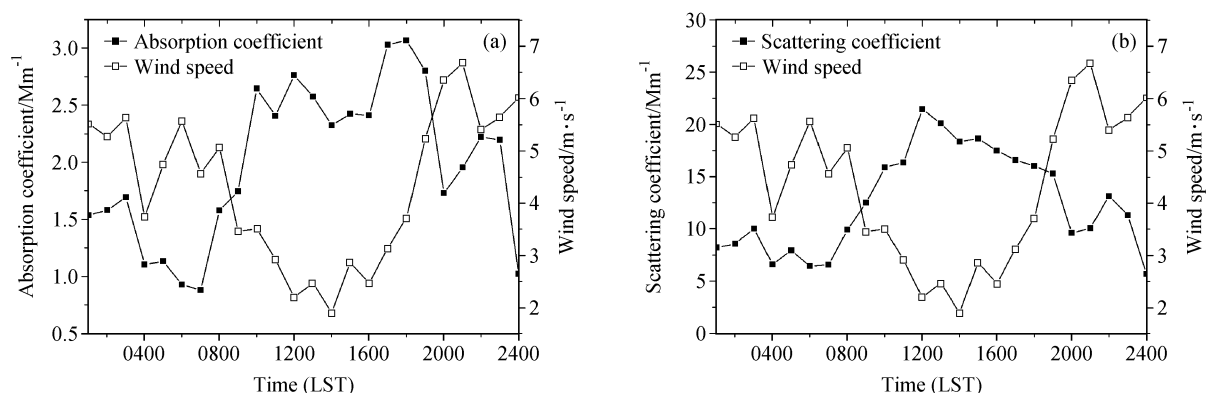


图5 相对湿度小于60%时 (a) 吸收系数和 (b) 散射系数与风速演变对比图

Fig. 5 The correlation between wind speed and (a) absorption coefficient, (b) scattering coefficient when relative humidity is less than 60%

更强的扩散出去,同时也带来了大量的清洁气团,这些清洁气团与局地空气混合,使局地气溶胶的浓度降低,最终造成了散射吸收系数同时下降。

4 结论

通过对黄山地区2008年5~7月大气气溶胶吸收和散射系数的连续观测,选取了5~6月在相对湿度小于60%条件下的数据进行分析,初步分析的结论如下:

(1) 黄山顶散射系数和吸收系数的日变化趋势基本相同,但散射系数比吸收系数大1个量级,大气中的消光过程以散射消光为主;

(2) 黄山顶散射吸收系数日变化的总趋势是白天大、晚上小,峰值出现在正午前,低值出现在傍晚和午夜,这主要是受大气边界层层结的日变化及大气湍流活动规律的影响;

(3) 黄山顶散射吸收系数日变化趋势与南京地区相反,而南京地区散射吸收系数比黄山地区大7~9倍,说明在黄山地区相对南京是清洁地区;

(4) 在干燥情况下,相对湿度与散射吸收系数有很好的正相关性,相对湿度与散射系数、吸收系数的相关系数分别为0.80和0.87;风速与散射吸收系数呈现很好的负相关关系,散射吸收系数与风速的相关系数分别为-0.78和-0.53,这主要是受到风速对粒子扩散的影响;当有雨水过境或大雾过后,散射吸收系数就会有较大的下降,降水等湿清除过程对大气气溶胶粒子的移除作用显著。

参考文献 (References)

- Adams K M, Davis Jr L I, Japar S M, et al. 1990. Real-time, in-situ measurement of atmospheric optical absorption in the visible via photoacoustic spectroscopy, IV, visibility degradation, and aerosol optical properties in Los Angeles [J]. *Atmos. Environ.*, 24: 605-610.
- Arnott W P, Moosmüller H, Rogers C F, et al. 1999. Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: instrument description [J]. *Atmos. Environ.*, 33: 2845-2852.
- Arnott W P, Hamasha K, Moosmüller H, et al. 2005. Towards aerosol light-absorption measurements with a 7-wavelength aethalometer: Evaluation with a photoacoustic instrument and 3-wavelength nephelometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 39: 17-29.
- Arnott W P, Moosmüller H, Sheridan P J, et al. 2003. Photoacoustic and filter-based ambient aerosol light absorption measurements: Instrument comparisons and the role of relative humidity [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), doi: 10.1029/2002JD002165.
- 安徽省统计局. 2008. 安徽统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 295pp.
- Statistics Bureau of Anhui Province. 2008. *Anhui Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistical Press, 295pp.
- Bond T C, Anderson T L, Campbell D. 1999. Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols [J]. *Aerosol Science and Technology*, 30 (6): 582-600.
- 陈宇, 银燕, 钱凌, 等. 2009. 南京北郊2007年10~12月大气气溶胶吸收和散射特性的观测 [J]. *气候与环境研究*, 14 (6): 613-620.
- Chen Yu, Yin Yan, Qian Ling, et al. 2009. Observation of the absorption and scattering coefficients of atmospheric aerosols in the north suburb of Nanjing from October to December 2007 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (6): 613-620.

- 胡欢陵, 许军, 黄正. 1991. 中国东部若干地区大气气溶胶虚折射指数特征 [J]. 大气科学, 15 (3): 18-13. Hu Huanling, Xu Jun, Huang Zheng. 1991. Characteristics of imaginary part of aerosol refractive index in some areas of eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (3): 18-13.
- Horvath H. 1993. Atmospheric light absorption—A review [J]. Atmos. Environ., 27: 293-317.
- Horvath H. 1997. Experimental calibration for aerosol light absorption measurements using the integrating plate method—Summary of the data [J]. Journal of Aerosol Science, 28: 1149-1161.
- 黄世鸿, 李子华, 杨军. 2000. 中国地区边界层大气气溶胶辐射吸收特性 [J]. 高原气象, 19 (4): 487-494. Huang Shihong, Li Zihua, Yang Jun. 2000. Light-absorbing properties of aerosols in the atmospheric boundary layer over China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (4): 487-494.
- Japar S M, Szkarlat A C. 1981. Measurement of diesel exhaust particulate using photoacoustic spectroscopy [J]. Combustion Science and Technology, 24: 215-219.
- 蒋龙海. 1983. 南京、黄山太阳可见光辐射的大气光谱光学厚度的初步分析 [J]. 自然杂志, 6 (12): 951-952. Jiang Longhai. 1983. The preliminary analysis of optical depth of atmospheric visible spectrum over Nanjing and Huangshan [J]. Nature Journal (in Chinese), 6 (12): 951-952.
- 李放, 吕达仁. 1996. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征 [J]. 大气科学, 20 (4): 385-394. Li Fang, Lü Daren. 1996. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (4): 385-394.
- 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2005. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 229-237. Li Yang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, et al. 2005. The variability and source apportionment of black carbon aerosol in Xi'an atmosphere during the autumn of 2003 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 229-237.
- 罗云峰, 吕达仁, 何晴, 等. 2000. 华南沿海地区太阳直接辐射、能见度及大气气溶胶变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 5 (1): 36-44. Luo Yunfeng, Lü Daren, He Qing, et al. 2000. An analysis of direct solar radiation, visibility and aerosol optical depth in South China coastal area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (1): 36-44.
- 毛节泰, 王强, 赵柏林. 1983. 大气透明度光谱和浑浊度的观测 [J]. 气象学报, 41 (3): 322-331. Mao Jietai, Wang Qiang, Zhao Bolin. 1983. The observation of the atmospheric transparency spectrum and the turbidity [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (3): 322-331.
- Moosmüller H, Arnott W P, Rogers C F, et al. 1998. Photoacoustic and filter measurements related to aerosol light absorption during the northern front range air quality study (Colorado, 1996/1997) [J]. J. Geophys. Res., 103 (28): 149-157.
- Petzold A, Niessner R. 1996. Photoacoustic soot sensor for in-situ black carbon monitoring [J]. Applied Physics B, 63: 191-197.
- Reidmiller D R, Hobbs P V, Kahn R. 2006. Aerosol optical properties and particle size distributions on the east coast of the United States derived from airborne in situ and remote sensing measurements [J]. J. Atmos. Sci., 63: 785-814.
- 邱金桓. 1986. 北京等地气象能见度的变化特征分析 [J]. 大气科学, 10 (4): 437-442. Qiu Jinhuan. 1986. An analysis of annual variation of visibility in Beijing and other places [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 10 (4): 437-442.
- 杨军, 李子华, 黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响 [J]. 大气科学, 23 (2): 239-247. Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. 1999. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (2): 239-247.
- 杨琨, 孙照渤, 倪东鸿. 2008. 1999~2003 年我国气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 31 (1): 92-96. Yang Kun, Sun Zhaobo, Ni Donghong. 2008. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over China during 1999-2003 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 92-96.
- 游荣高, 洪钟祥, 吕位秀, 等. 1983. 边界层大气气溶胶浓度与尺度谱分布的时空变化 [J]. 大气科学, 7 (1): 88-94. You Ronggao, Hong Zhongxiang, Lu Weixiu, et al. 1983. Variation of atmospheric aerosol concentration and size distribution in the boundary layer with time and altitude [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 7 (1): 88-94.
- 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 2002. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究 [J]. 应用气象学报, 13 (增刊): 136-143. Zhang Yuxiang, Hu Xiuqing, Liu Yujie, et al. 2002. Measurement of atmospheric aerosol optical characteristics in Beijing urban area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (suppl.): 136-143.
- 宗雪梅, 邱金桓, 王普才. 2005. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 201-208. Zong Xuemei, Qiu Jinhuan, Wang Pucai. 2005. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over 16 radiation stations in the last 10 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 201-208.
- 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 1998. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟 [J]. 大气科学, 22 (4): 418-427. Zhou Xiujie, Li Weiliang, Luo Yunfeng. 1998. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 418-427.